

Skripsi

**STUDI LAJU KEHILANGAN MASSA PADA EVOLUSI BINTANG
*RED SUPERGIANT (RSG)***

**ANDI AGUNG PRAWIRA NEGARA
H021171510**



**DEPARTEMEN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2023**

**STUDI LAJU KEHILANGAN MASSA PADA EVOLUSI BINTANG
RED SUPERGIANT (RSG)**

SKRIPSI

*Diajukan Sebagai Salah Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Sains
Pada Program Studi Fisika Departemen Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Hasanuddin*

**ANDI AGUNG PRAWIRA NEGARA
H021171510**

**DEPARTEMEN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR**

2023

HALAMAN PENGESAHAN

**STUDI LAJU KEHILANGAN MASSA PADA EVOLUSI BINTANG *RED*
SUPERGIANT (RSG)**

Disusun dan diajukan oleh:

ANDI AGUNG PRAWIRA NEGARA

H021171510

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin
Pada Agustus 2023
Dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan.

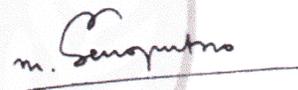
Menyetujui,

Pembimbing Utama



Prof. Dr. Tasrief Surungan, M.Sc.
NIP. 196702221992031003

Pembimbing Pertama



Dr. Mahasena Putra, M.Sc.
NIP. 196312061994121001

Ketua Program Studi




Prof. Dr. Arifin, M.T
NIP. 196705201994031002

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Andi Agung Prawira Negara
NIM : H021171510
Program Studi : Fisika
Jenjang : S1

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa karya tulisan saya yang berjudul:

STUDI LAJU KEHILANGAN MASSA PADA EVOLUSI BINTANG RED SUPERGIANT (RSG)

Adalah karya tulis berdasarkan hasil pemikiran dan penelitian saya, bukan merupakan hasil pengambil alihan tulisan maupun pemikiran orang lain. Jika terdapat karya orang lain dalam skripsi ini, maka akan dicantumkan sumber yang benar dan jelas. Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, jika dikemudian hari terdapat ketidakbenaran dan penyimpangan dalam pernyataan ini, maka saya berhak menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 14 Agustus 2023

Yang Menyatakan



Andi Agung Prawira Negara
H021171510

ABSTRAK

Evolusi pasca deret utama pada evolusi bintang masif merupakan hal yang kompleks dan bergantung pada banyak parameter model bintang. Salah satu dari sekian banyak parameter tersebut adalah kehilangan massa bintang. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis masa hidup bintang di fase RSG, jejak evolusi di diagram Hertzsprung-Russel (HR) dan beberapa parameter fisis lainnya yang mengalami perubahan ketika laju kehilangan massa di fase RSG ditingkatkan. Digunakan program Modules for Experiment in Stellar Astrophysics (MESA) sebagai alat komputasi untuk membuat simulasi evolusi model bintang masif dari deret utama hingga temperatur inti (T_c) di inti bintang mencapai 10^9 K. Model yang dibangun adalah bintang tunggal dan tidak berotasi dengan massa awal $12M_{\odot}$, $15M_{\odot}$, $20M_{\odot}$, dan $25M_{\odot}$ dengan metalisitas $Z=0,02$. Hasil yang diperoleh adalah bahwa peningkatan laju kehilangan massa di fase RSG memberikan pengaruh yang signifikan terhadap jejak evolusi bintang masif di fase pasca deret utama. Selain itu, hal ini juga berperan dalam menentukan progenitor bintang masif sebelum terjadinya fenomena supernova. Serta untuk model dengan massa yang lebih besar, peningkatan laju kehilangan massa tidak secara signifikan memengaruhi total massa yang hilang di fase RSG, namun durasi atau masa hidup yang dihabiskan di fase RSG.

Kata Kunci: *Maharaksasa Merah, Bintang Masif, Evolusi Bintang, Kehilangan Massa.*

ABSTRACT

The post-main sequence evolution in massive star evolution is a complex process that depends on various stellar model parameters. One of these numerous parameters is stellar mass loss. This study aims to analyze the lifetime of stars in the Red Supergiant (RSG) phase, their evolutionary tracks on the Hertzsprung-Russell (HR) diagram, and several other physical parameters that undergo changes when the mass loss rate during the RSG phase is increased. The Modules for Experiment in Stellar Astrophysics (MESA) program is utilized as a computational tool to create simulations of the evolution of massive star models from the main sequence to the core temperature (T_c) reaching 109 K. The constructed models are non-rotating single stars with initial masses of $12M_{\odot}$, $15M_{\odot}$, $20M_{\odot}$, and $25M_{\odot}$, with a metallicity of $Z=0.02$. The obtained results show that an increase in mass loss rate during the RSG phase significantly influences the evolutionary tracks of massive stars in the post-main sequence phase. Additionally, this phenomenon plays a role in determining the progenitor of massive stars before the occurrence of supernova events. For models with larger masses, an increased mass loss rate does not significantly affect the total mass lost during the RSG phase, but it does influence the duration or lifespan spent in the RSG phase.

Keywords: Red Supergiant · Massive Stars · Stellar Evolution · Mass Loss

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa, yang atas berkat rahmat dan karunia-Nya, penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “Studi Laju Kehilangan Massa pada Evolusi Bintang Maharaksasa Merah”. Salah satu alasan utama yang membuat penulis memilih peminatan Fisika Teori dan Komputasi di tahun ketiga perkuliahan adalah karena pada dasarnya tertarik untuk belajar astronomi/astrofisika lebih lanjut di tingkat universitas (karena ada mata kuliahnya di peminatan ini). Pada akhirnya, mengerjakan tugas akhir di bidang astrofisika ini adalah bagian dari cita-cita penulis sejak menjadi mahasiswa baru. Penulis senang sekali pada akhirnya berhasil menyelesaikan tugas akhir ini di bawah bimbingan pak Mahasena dan Prof. Tasrief. Berhasil Menyelesaikan tugas akhir ini layaknya naik satu anak tangga dalam konteks “piramida” di dunia akademik dan tentu merupakan bekal bagi penulis dari segi pengalaman dan pengetahuan guna menyelesaikan hal-hal serupa di masa yang akan datang.

Di beberapa kutipan biasanya ada yang menyebutkan bahwa menyelesaikan sarjana itu layaknya orang mendaki gunung. Sepanjang perjalanan tentu “normalnya” tidak akan ada orang yang mendaki gunung tinggi seorang diri. Jadi dalam lembaran ini, penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada orang-orang yang telah kebersamai, mendukung, dan membantu penulis selama proses pendakian “gunung” ini. Penulis sadar bahwa tidak akan berdiri di “puncak” tanpa kalian semua, yakni:

1. Kedua orang tua penulis Ayah (**Drs. Rakibe**) dan Ibu (**Andi Rahmini**) yang memotivasi penulis untuk menjadi lebih baik yang tidak pernah memutuskan doanya dan senantiasa mendukung dari kejauhan, baik secara moral maupun materiil. Kakak penulis, **Anita** yang selama ini menjadi tempat untuk berkeluh kesah selama masa perkuliahan.
2. **Nur Hasanah, S.Si., M.Si.** (almh.) selaku pembimbing tugas akhir penulis. Terima kasih untuk semua hal yang telah diajarkan selama ini. *May your soul rest in peace and May almighty Allah dwell you in jannatul firdaus.*
3. **Prof. Dr. Tasrief Surungan, M.Sc.** selaku dosen pembimbing utama yang bersedia menggantikan (almh.) ibu **Nur Hasanah** dan berkenan untuk membantu dalam proses pencarian pembimbing eksternal dari ITB.

4. **Dr. Mahasena Putra, S.Si., M.Sc.** dari KK. Astronomi FMIPA Institut Teknologi Bandung selaku dosen pembimbing pertama, atas kesediaannya membimbing penulis untuk menyelesaikan tugas akhir ini yang juga merupakan pembimbing ibu **Nur Hasanah** ketika beliau S1 dulu (2001-2006). Terima kasih atas semua diskusi dan bimbingan yang sangat-sangat berharga, saya senang sekali bisa menghabiskan waktu bersama dan bertanya banyak hal.
5. **Bapak/Ibu Dosen** yang telah mengajarkan banyak hal selama penulis berkuliah di Universitas Hasanuddin.
6. Kepada kawan-kawan **Himafi 2017**, terima kasih mewarnai masa kuliah penulis selama 5 tahun lebih (ini sebenarnya diaproksimasi jadi 6 tahun). Ada berbagai cerita menarik dan tidak terlupakan yang telah dilalui bersama dan kelak akan dikenang sebagai “memori masa kuliah S1” khususnya di medan jihad bina kader entah itu sebagai maba yang tersakiti, masa-masa panitia yang lebih tersakiti lagi (2x lipat), masa menjadi pengurus himpunan yang cenderung biasa-biasa saja dan agak “kajili-jili” serta masa menjadi *steering committee* yang juga biasa-biasa saja. *The world is changing but good memories stay forever* dan juga selalu ingat **golden rules** dari kakanda kita yang tercinta kak (lord) hafis fisika 2015 bahwa “sesama **warga (himafi) harus (selalu) saling membantu**”, temanmu adalah dia yang menggunakan anorak biru, dan juga sejauh apapun kita melangkah, **Himafi** adalah tempat kita kembali, Jayalah Himafi Fisika nan Jaya.
7. Segenap pegawai Departemen Fisika dan Fakultas MIPA yang telah memberikan dukungan dan bantuan dalam menunjang kelancaran studi penulis.
8. Mbak **Sinta Ayu Sakinah, S.Si., M.Si.** dari Pascasarjana Astronomi ITB yang berkenan untuk membagikan file program tesisnya yang selanjutnya digunakan oleh penulis untuk belajar ketika di awal-awal masa pengerjaan tugas akhir ini (saya di semester 9 ketika itu).
9. Mbak **Adinda Faradila** dari Astronomi 2016 ITB yang berkenan menjawab berbagai pertanyaan penulis seputar fisika bintang dan juga berbagi beberapa pustaka seputar m.k. Fisika Bintang, Evolusi Bintang, Proses Astrofisika 1, dan beberapa mata kuliah lain yang pernah dilaluinya.

10. **Harmiati Harbi** dari [Himafi 2020](#) yang ketika proposal tugas akhir ini digarap, sedang mengikuti pertukaran mahasiswa di ITB dan berkenan membantu penulis dalam pengiriman pustaka (i)legal dari perpustakaan astronomi.
11. Kawan-kawan (baca: adik-adik kelasku) yang hadir di masa perkuliahan part 3 ku (part 1 sebelum covid, part 2 saat covid), yaitu di semester 11 dan 12 ini (semester ‘terbaik’ yang pernah kujalani selama kuliah *for sure*), senang sekali bisa kenal dengan kalian semua.
12. Ucapan terima kasih pada poin ini penulis ucapkan untuk kawan-kawanku maupun pihak lain yang tidak dapat diucapkan satu per satu. Sekecil apapun interaksi yang terjadi dengan penulis di masa lalu, mungkin memiliki dampak hingga saat ini terhadap pengembangan karakter dari penulis. Apabila anda merasa kecewa karena tidak menerima ucapan terima kasih di poin-poin sebelumnya, mohon maaf karena buku ini adalah buku tugas akhir dan bukan buku ucapan terima kasih.

Bagi siapapun yang membaca buku ini, semoga tetap menikmati setiap halaman yang dituliskan, mendapatkan manfaat yang dicari, serta mendapatkan pencerahan untuk melakukan suatu penelitian yang diminati terutama untuk penelitian terkait dengan kajian evolusi bintang dan kiranya bisa menjadi inspirasi bagi kawan-kawan yang membaca.

Makassar, 10 Agustus 2023

Penulis
Andi Agung Prawira Negara

“Jangan kita memandang ilmu itu sebagai sesuatu yang di kotak-kotakkan”

- Eko Juarlin, S.Si., M.Si.

(suatu waktu di kelas Metode Numerik semester ganjil 2018)

DAFTAR ISI

HALAMAN SAMPUL	i
HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN	iv
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xv
BAB I PENDAHULUAN	
I.1 Latar Belakang	1
I.2 Rumusan Masalah	2
I.3 Tujuan Penelitian	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
II.1 Evolusi Bintang Masif	3
II.1.1 Big Bang	4
II.1.2 Pembentukan Bintang (<i>Star Formation</i>)	8
II.1.3 Fase Pra-Deret Utama (<i>Pre-Main Sequence Star</i>)	9
II.1.4 Fase Deret Utama (<i>Main Sequence</i>)	11
II.1.5 Maharaksasa Merah (<i>Red Supergiant</i>)	14
II.1.6 Supernova	16
II.2 Kehilangan Massa dan Angin Bintang	17
II.3 Mekanisme Kehilangan Massa Bintang RSG	19
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	
III.1 Studi Literatur	21
III.2 Perhitungan dengan Komputasi Numerik	21
III.2.1 MESA	21
III.2.2 Algoritma Laju Kehilangan Massa	23
III.2.2.1 Vink et al. (V)	23

III.2.2.2 Nieuwenhuijzen & de Jager (NJ)	25
III.2.2.3 Nugis & Lamers (NL)	26
III.2.3 Deskripsi Model Bintang	27
III.3 Pengolahan Data	28
III.4 Bagan Alir Penelitian	29
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	
IV.1 Jejak Evolusi dan Masa Hidup di Fase RSG	30
IV.2 Struktur Internal dan Pembakaran Elemen Kimia di Fase RSG	37
IV.3 Evolusi Pasca Fase RSG	42
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
V.1 Kesimpulan	46
V.2 Saran	46
LAMPIRAN	47
DAFTAR PUSTAKA	48

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Siklus hidup bintang di alam semesta	3
Gambar 2.2 Kenampakan Jalur Pra Deret Utama pada diagram HR	10
Gambar 2.3 Ilustrasi Protostar	10
Gambar 2.4 Kesetimbangan antara gaya tekan $P(r)$ dan gaya gravitas F_g pada selubung massa bintang	11
Gambar 2.5 Massa vs Masa Hidup di Fase Deret Utama Pada Bintang	12
Gambar 2.6 Jejak evolusi bintang pada diagram HR	13
Gambar 2.7 Reaksi kimia siklus CNO (Karbon-Nitrogen-Oksigen)	14
Gambar 2.8a Jejak Evolusi Bintang Masif di Diagram HR	15
Gambar 2.8b Struktur Internal Bintang Masif	15
Gambar 2.9 Klasifikasi Supernova	16
Gambar 2.10 Angin Bintang pada diagram Hertzsprung-Russell	18
Gambar 2.11 Mekanisme kehilangan massa dust-driven winds	20
Gambar 3.1 Koleksi modul yang terdapat pada MESA	22
Gambar 3.2 Bagan Alir Penelitian.....	29
Gambar 4.1 Jejak evolusi untuk model bintang $12M_{\odot}$, $15M_{\odot}$, $20M_{\odot}$, $25M_{\odot}$ dengan berbagai peningkatan laju kehilangan massa di fase RSG	30
Gambar 4.2a: Waktu yang dihabiskan di fase RSG (dalam skala logaritmik) sebagai fungsi dari peningkatan laju kehilangan massa di fase RSG	32
Gambar 4.2b: Fraksi massa yang hilang di fase RSG sebagai fungsi dari peningkatan laju kehilangan massa di fase RSG	32
Gambar 4.3 Massa total dari semua model bintang sebagai fungsi dari total masa hidup bintang (Myr)	34
Gambar 4.4 Diagram HR dan plot pembakaran elemen kimia di pusat hingga permukaan model $12M_{\odot}$ di fase RSG (a) $\times 1\dot{M}$ std. (b) $\times 3\dot{M}$ std. (c) $\times 5\dot{M}$ std. .	37
Gambar 4.5 Diagram HR dan plot pembakaran elemen kimia di pusat hingga permukaan model $15M_{\odot}$ di fase RSG (a) $\times 1\dot{M}$ std. (b) $\times 3\dot{M}$ std. (c) $\times 5\dot{M}$ std. .	38
Gambar 4.6 Diagram HR dan plot pembakaran elemen kimia di pusat hingga permukaan model $20M_{\odot}$ di fase RSG (a) $\times 1\dot{M}$ std. (b) $\times 3\dot{M}$ std. (c) $\times 5\dot{M}$ std. .	39
Gambar 4.7 Diagram HR dan plot pembakaran elemen kimia di pusat hingga permukaan model $25M_{\odot}$ di fase RSG (a) $\times 1\dot{M}$ std. (b) $\times 3\dot{M}$ std. (c) $\times 5\dot{M}$ std. .	40
Gambar 4.8 Struktur Internal Bintang RSG	41

Gambar 4.9 Struktur bintang masif selama berevolusi.....44

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Kronologi Alam Semesta	5
Tabel 3.1 Model Bintang Tidak Berotasi $Z = 0.019$	28
Tabel 4.1 Masa hidup bintang, masa hidup bintang di fase RSG, dan beberapa properti lainnya di akhir evolusi model bintang	36
Tabel 4.2 Massa akhir, massa selubung hidrogen, dan jenis supernova di akhir evolusi model bintang	42
Tabel 4.3 Durasi berbagai fase pasca RSG (dalam Myr)	43

BAB I PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Fase Maharaksasa merah (*Red Supergiant*) atau biasa disingkat menjadi fase RSG disebut sebagai fase yang paling penting selama masa hidup bintang masif. Hal ini karena sebagian besar bintang masif nantinya akan menghabiskan waktu akhir hidupnya di fase ini [1]. Fase RSG dapat menjadi fase akhir yang dialami oleh bintang masif ataupun merupakan fase transisi sebelum bintang masif meledak sebagai supernova ketika berada di fase Maharaksasa kuning (YSG), *luminous blue variable* (LBV), maharaksasa biru (BSG), ataupun bintang Wolf-Rayet (WR) [2].

Satu hal yang menarik untuk dikaji pada fase RSG adalah fenomena kehilangan massa bintang. Oleh karena radius bintang RSG yang sangat besar, sekitar $500-1500 R_{\odot}$, maka hal ini akan berimplikasi pada kecilnya gaya tarik gravitasi. Kecilnya gaya gravitasi inilah yang selanjutnya membuat bintang RSG tidak mampu untuk menahan materi pada selubung terluarnya dan kemudian menjadi salah satu penyebab terlepasnya sebagian besar materi bintang ke medium antarbintang yang kemudian dikenal dengan istilah kehilangan massa bintang. Dengan laju yang relatif besar yakni sekitar 10^{-6} hingga $10^{-4} M_{\odot}$ per tahun [2,3,4].

Kehilangan massa di fase RSG pada dasarnya akan sangat krusial karena dapat memberikan pengaruh besar di beberapa aspek. Tiga di antaranya adalah pada masa hidup bintang, kelimpahan unsur elemen kimia di permukaan bintang, dan jejak evolusi bintang di diagram Hertzsprung-Russell (diagram HR) [6][7]. Bintang masif dapat kehilangan lebih dari setengah massa awalnya di fase pasca deret utama dan mayoritas hal ini akan terjadi pada fase RSG [8][9]. Meskipun demikian, hingga saat ini mekanisme kehilangan massa di fase RSG masih belum dipahami seutuhnya serta menjadi tantangan besar yang belum terpecahkan oleh astronom [10][9].

Berbagai metode komputasi telah dikembangkan dalam upaya menelusuri pengaruh kehilangan massa terhadap evolusi bintang masif (di fase RSG). Salah satunya adalah oleh Renzo, dkk. (2017) yang membandingkan algoritma parametrik

angin bintang (penyebab kehilangan massa) serta efeknya terhadap evolusi bintang masif dengan menggunakan kode program evolusi bintang MESA. MESA merupakan salah satu kode program evolusi bintang satu dimensi yang terbukti efektif dan *powerful* dalam mensimulasikan dan menelusuri jejak evolusi bintang mulai dari bintang seukuran matahari hingga bintang masif.

Pada penelitian ini akan dibuat program untuk menelusuri jejak evolusi bintang masif menggunakan kode program evolusi bintang MESA-r7624. Model yang dihasilkan dari program ini kemudian digunakan untuk menyelidiki bagaimana peningkatan laju kehilangan massa di fase RSG mempengaruhi perubahan parameter fisis pada evolusi bintang masif.

I.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana pengaruh peningkatan laju kehilangan massa di fase *red supergiant* terhadap perubahan parameter fisis (properti) pada evolusi bintang masif ?
2. Bagaimana pengaruh peningkatan laju kehilangan massa di fase *red supergiant* terhadap evolusi bintang pasca *red supergiant*.

I.3 Tujuan Penelitian

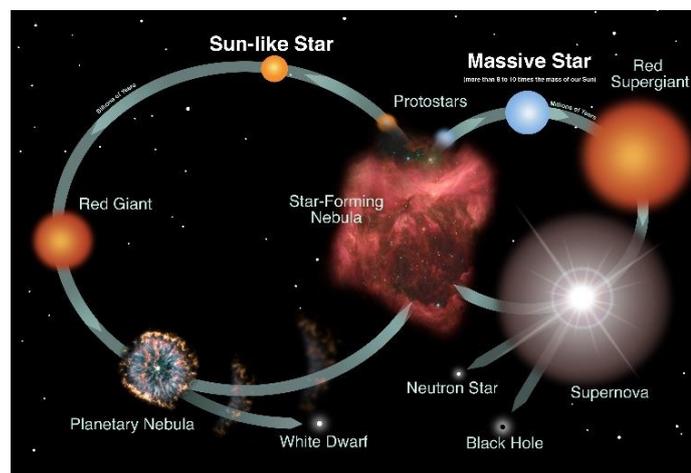
1. Menganalisis pengaruh peningkatan laju kehilangan massa di fase *red supergiant* terhadap perubahan parameter fisis pada evolusi bintang masif.
2. Menganalisis pengaruh peningkatan laju kehilangan massa di fase *red supergiant* terhadap evolusi pasca *red supergiant*.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Evolusi Bintang Masif

Untuk seorang fisikawan, bintang didefinisikan sebagai sebuah sistem di mana terdapat bola gas yang memiliki gaya gravitasi yang arahnya ke dalam diimbangi oleh gaya tekanan radiasi yang berasal dari sumber energi internal. Adapun bagi matematikawan, bintang merupakan sistem tertutup yang didefinisikan oleh pasangan $4+N^1$ persamaan diferensial non-linear bergantung waktu. Di mana N merupakan jumlah elemen kimia yang terdapat pada bintang [11].

Bagi seorang astronom, bintang merupakan penyusun utama (*main building-block*) alam semesta, sehingga pemahaman terkait struktur dan evolusinya merupakan aspek yang penting untuk dipahami. Bintang merupakan salah satu topik mendasar yang banyak dibahas di astrofisika, kosmologi, dan fisika. Di astrofisika sebagai contoh, kajian tentang bintang merupakan hal yang sangat fundamental. Hal ini terkait dengan proses pembentukan, evolusi, dan *nuclear lifetimes*-Nya yang memberikan pengaruh besar terhadap evolusi materi secara keseluruhan di alam semesta dan juga evolusi kimia galaksi [12].



Gambar 2.1. Siklus hidup bintang di alam semesta

Evolusi bintang secara umum bergantung pada tiga parameter utama, yaitu massa awal, metalisitas (Z), dan kecepatan rotasi. Selain itu, evolusi bintang juga dipengaruhi oleh beberapa hal minor lainnya seperti komposisi kimia, medan

magnet, dan apakah bintang tersebut merupakan sistem bintang ganda atau bukan. Tiga parameter utama ini jika ditelusuri lebih lanjut maka akan ditemukan bahwa massa awal bintang merupakan parameter yang paling berpengaruh.

Selanjutnya, berdasarkan massa awal, jalur evolusi bintang dapat diklasifikasikan menjadi tiga bagian. Bagian pertama yaitu bintang bermassa rendah ($M_{\text{init}} \leq 2M_{\odot}$), kedua adalah bintang bermassa menengah ($2M_{\odot} \leq M_{\text{init}} \leq 8M_{\odot}$), dan bagian ketiga adalah bintang bermassa besar ($M_{\text{init}} \geq 8M_{\odot}$) atau yang dikenal juga dengan istilah bintang masif [13][14][15]. Bintang di bagian pertama dan kedua seiring dengan evolusinya akan memiliki inti karbon/oksigen yang terdegenerasi yang mencegah terjadinya pembakaran termonuklir. Inti bintang akan runtuh dan kemudian membentuk bintang katai putih. Sementara itu, bintang akan melepaskan selubung terluarnya (teramati sebagai nebula) dan kemudian membentuk planetari nebula. Pada akhirnya ketika nebula yang tadinya menyelimuti bintang tersingkap, maka akan teramati objek bintang katai putih.

Bintang masif, sementara itu, akan melanjutkan pembakaran untuk elemen-elemen kimia yang lebih berat hingga nantinya akan menyisakan inti bintang yang kaya akan kandungan elemen besi. Kemudian terjadi fenomena supernova yang nantinya akan menghasilkan produk berupa bintang neutron, lubang hitam, ataupun pada kasus yang tidak umum justru tidak menyisakan apapun [16]. Mayoritas bintang masif akan mengalami fenomena ledakan ini ketika berada di fase *red supergiant* (RSG). Fase di mana bintang masif akan menghabiskan 10% dari waktu hidupnya.

Subbab berikut ini akan menjelaskan lebih lanjut perihal mekanisme fisis yang terjadi pada evolusi bintang masif di tiap-tiap fase yang dilewatinya.

II.1.1 Big Bang

Alam semesta sebagai “ruang besar” di mana manusia tinggal di dalamnya diyakini berasal dari sebuah mekanisme. Mekanisme ini dikenal dengan istilah Teori *Big Bang* atau ledakan titik. Mekanisme ini bercerita bahwa ledakan titik inilah yang merupakan awal dari alam semesta. Oleh karena diinisiasi oleh sebuah ledakan yang mana secara tidak langsung juga berarti bahwa tidak terdapat apapun sebelum terjadinya peristiwa ledakan, artinya dimensi waktu t baru dimulai ketika

ledakan tersebut pertama kali terjadi. Jadi, ketika big bang waktu $t = 0$ sekon dan mulai bertambah setelahnya dan banyak hal yang terjadi sembari temperatur di sekitarnya menurun. Tabel berikut merangkum beberapa peristiwa yang terjadi dari awal terjadinya *big bang*.

Tabel 2.1. Kronologi Alam Semesta

Kronologi Alam Semesta			
Interval Waktu	T (K)	Peristiwa	Kurun Waktu
$0 \text{ s} - 10^{-43} \text{ s}$	$> 10^{32}$	Empat gaya fundamental disatukan menjadi satu gaya tunggal karena suhu yang sangat tinggi. <i>Theory of Everything</i> mencoba memodelkan gaya ini.	Era Planck
$10^{-43} \text{ s} - 10^{-36} \text{ s}$	$> 10^{29}$	Oleh karena penurunan temperatur, gaya gravitasi dipisahkan sehingga meninggalkan gaya nuklir kuat untuk mendominasi, teori unifikasi besar mencoba memodelkan gaya ini.	Era Unifikasi Besar
$10^{-36} \text{ s} - 10^{-32} \text{ s}$	$10^{28} - 10^{22}$	Gaya nuklir kuat dipisahkan sehingga kemudian akan meninggalkan gaya nuklir lemah untuk mendominasi. Dan alam semesta mengembang menjadi 10^{26} kali dari volume awalnya, menyebarkan partikel fundamental secara seragam.	Gaya Nuklir Lemah atau Era Inflasi

$10^{-32} \text{ s} - 10^{-12} \text{ s}$	10^{15}	Pada temperatur ini gaya nuklir lemah dipisahkan dan pada akhirnya menginisiasi pembentukan medan higgs. <i>Large Hadron Collider</i> (LHC) masih dapat mencapai temperatur ini.	Era Berakhirnya Gaya Nuklir Lemah
$10^{-12} \text{ s} - 10^{-6} \text{ s}$	$10^{15} - 10^{12}$	Medan higgs memberikan massa kepada partikel. Tapi temperatur masih terlalu tinggi untuk quark bisa combine/menyatu dan membentuk hadron. Sehingga ruang alam semesta akan didominasi oleh Quark-Gluon Plasma.	Era Quark
$10^{-6} \text{ s} - 1 \text{ s}$	$10^{12} - 10^{10}$	Quark dan Gluon bersatu untuk kemudian membentuk hadron selanjutnya proton dan neutron.	Era Hadron
$1 \text{ s} - 10 \text{ s}$	$10^{10} - 10^9$	Semua hadron dan anti hadron teranihilasi pada akhir dari era sebelumnya sehingga menyisakan lepton (elektron, muon, dan beberapa neutrino) dan antilepton yang mendominasi alam semesta	Era Lepton
$10 \text{ s} - 17 \text{ min}$	$10^9 - 10^7$	Baryon seperti proton dan neutron melakukan fusi untuk membentuk inti atom yang	Big Bang Nucleosintesis

		<p>lebih kecil seperti ${}^1_1\text{H}$, ${}^2_1\text{H}$, ${}^3_2\text{He}$, ${}^4_2\text{He}$, dan ${}^7_3\text{Li}$.</p> <p>Inti atom dan elektron dihamburkan di alam semesta dalam bentuk plasma.</p>	
17 min - 377 kyr	10^9 – 4000	<p>Pada temperatur ini, fusi nuklir dan proses nukleosintesis berhenti dan rasio dari H:He menjadi 3:1. Serta sejumlah energi nuklir dilepaskan dalam bentuk foton, sehingga energi alam semesta didominasi oleh foton.</p>	Era Foton
18 kyr – 377 kyr	4000	<p>Elektron ditangkap oleh inti atom dan membentuk atom netral di keadaan dasar. Proses ini melepaskan foton dalam jumlah besar yang saat ini mengalami redshift ke panjang gelombang mikro dan teramati sebagai <i>Cosmic Microwave Background</i> (CMB) di alam semesta saat ini.</p>	Era Rekombinasi
370 Kyr – 150 Myr	4000 – 60	<p>Dark Ages adalah masa di antara rekombinasi dan masa ketika bintang pertama kali terbentuk. Masa ini ditandai</p>	Dark Ages

		<p>sebagai masa di mana ketika si alam semesta ini hanya berisi gas hidrogen netral dan tidak ada cahaya tampak.</p>	
<p>200 Myr – 1Gyr</p>	<p>60 – 19</p>	<p>Era ini ditandai sebagai tempat pertama kalinya galaksi dan bintang-bintang itu terbentuk yang mengionisasi alam semesta untuk pertama kalinya. Dari sini nanti, galaksi-galaksi muda, quasar, dan lain-lain akan tumbuh terus untuk kemudian membentuk struktur skala besar, dan membentuk gugus galaksi (misalnya) dan galaksi lain yang kita, kita amati di alam semesta saat ini contohnya seperti andromeda, bima sakti, dan lain-lain</p>	<p>Era Reionisasi</p>
<p>13.8 Gyr</p>	<p>2.7</p>	<p>Pengamatan foton terjauh pada masa ini adalah CMB foton. Foton ini kemudian tiba dari bola raksasa dengan radius 46 juta tahun cahaya. Volume di dalam bola ini kemudian biasanya merujuk pada <i>observable universe</i>.</p>	<p>Saat ini</p>

II.1.2 Pembentukan Bintang (*Star Formation*)

Bintang pada mulanya terbentuk dari awan antar bintang yang mengalami keruntuhan yang disebabkan oleh ketidakstabilan gravitasi. Hal ini kemudian membuat awan akan mengalami kontraksi hingga internal awan tersebut akan mencapai nilai kerapatan dan temperatur tertentu untuk kemudian memulai pembakaran nuklir. Perbandingan antara energi kinetik (termal) dan energi potensial dalam bintang dapat digunakan untuk memperoleh estimasi jumlah minimum massa yang dibutuhkan untuk memulai proses pembentukan bintang. Massa minimum ini kemudian dikenal dengan istilah massa Jeans (M_J). Secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut [15, 16].

$$M_J \approx \left(\frac{5kT}{G\mu m_H} \right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{3}{4\pi\rho_0} \right)^{\frac{1}{2}} M_{\odot} \quad 2.1$$

Suatu saat ketika massa awan (M_C) melebihi massa jeans pada persamaan 2.1 di atas (disebut juga sebagai kriteria Jeans).

$$M_C > M_J \quad 2.2$$

Maka yang terjadi selanjutnya adalah awan akan berkontraksi dan memulai proses pembentukan bintang. Kriteria Jeans juga dapat diekspresikan melalui R yang merupakan radius awan minimal untuk mengalami keruntuhan dengan kerapatan ρ_0 [19].

$$R_C > R_J \quad 2.3$$

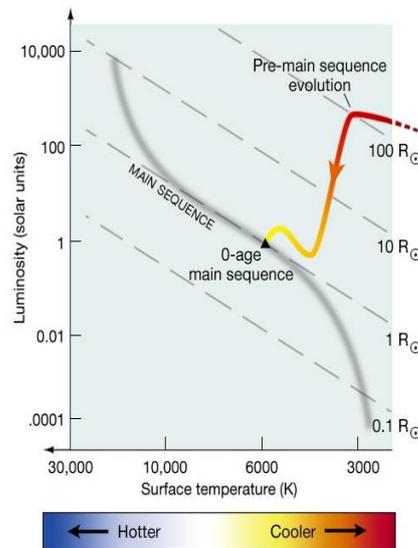
Dimana

$$R_J \cong \left(\frac{15kT}{4\pi G\mu m_H \rho_0} \right)^{\frac{1}{2}} \quad 2.4$$

II.1.3 Fase Pra-Deret Utama (*Pre-main Sequence Star*)

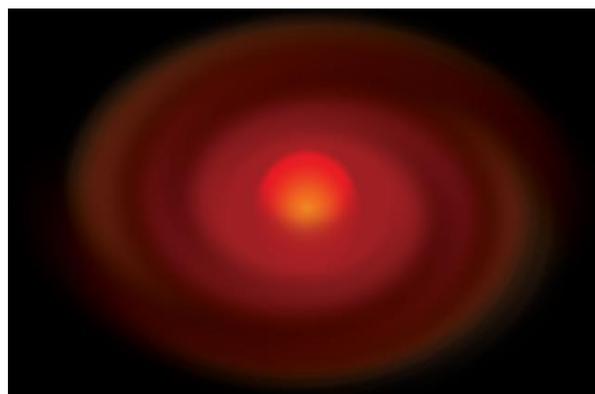
Fase pra-deret utama merupakan terminologi yang merujuk kepada fase awal setelah terjadinya peristiwa pembentukan bintang serta fase sebelum bintang mencapai deret utama. Objek Pra-Deret Utama ini terbentuk dari fragmentasi dan keruntuhan awan molekul besar [20] dan merupakan sebuah protobintang yang mengembang dan mendapatkan massa dari selubung debu dan gas antarbintang. Inti

dari protobintang akan memiliki temperatur yang sangat tinggi ketika itu, namun belum mampu untuk melakukan pembakaran nuklir.



Gambar 2.2. Kenampakan Jalur Pra Deret Utama pada diagram HR.

Sebaliknya, protobintang masih dalam proses mendapatkan massa dari gas di medium antarbintang sehingga massanya masih akan terus bertambah. Gambar 2.3 berikut ini memperlihatkan penampakan visual dari protobintang. Cahaya binar merah pada gambar disebabkan oleh radiasi yang dipancarkan karena panas yang dihasilkan oleh ion internal (disebabkan oleh tekanan). Bintang kemudian akan memulai kontraksi dan disaat yang bersamaan temperatur dalam bintang akan meningkat sampai ketika dia memulai pembakaran hidrogen di fase deret utama. Periode di mana ketika bintang ini berkontraksi dan temperatur dalam bintang meningkat inilah yang selanjutnya dikenal dengan istilah fase pra-deret utama.

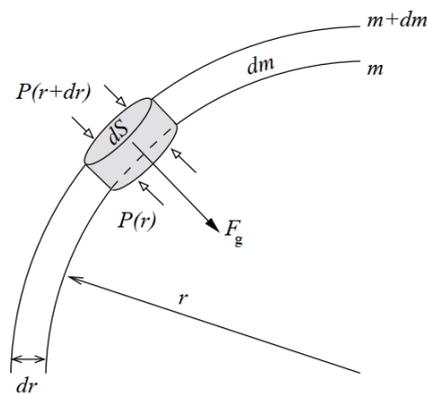


Gambar 2.3 Ilustrasi Protostar

II.1.4 Fase Deret Utama (*Main Sequence*)

Fase deret utama adalah fase di mana energi akan dilepaskan oleh satu-satunya pembakaran nuklir yang terjadi di inti bintang yaitu pembakaran hidrogen (^1H) menjadi helium (^4He). Bintang secara umum akan menghabiskan sekitar 90% masa hidupnya di fase ini dan akan berada dalam kesetimbangan hidrostatis di antara dua gaya [17]. Dua gaya yang dimaksud adalah gaya gravitasi yang menarik seluruh massa ke arah inti bintang dan (gaya) tekanan radiasi yang mendorong materi dan energi hasil reaksi nuklir mengalir ke luar bintang. Kesetimbangan hidrostatis secara matematis dapat dituliskan pada persamaan 2.5 berikut ini.

$$\frac{dP}{dr} = -G \frac{M_r \rho}{r^2} = -\rho g \text{ (kesetimbangan hidrostatis)} \quad (2.5)$$



Gambar 2.4 Kesetimbangan antara gaya tekan $P(r)$ dan gaya gravitasi F_g pada selubung massa bintang.

Di mana $g \equiv GM_r/r^2$ merupakan percepatan gravitasi lokal pada radius r . Persamaan 2.5 ini adalah salah satu persamaan fundamental struktur bintang pada objek simetri bola. Persamaan ini secara langsung mengatakan bahwa agar bintang dapat berada dalam kondisi statik, tekanan gradien dP/dr harus “ada” untuk **menetralkan/melawan** gaya gravitasi yang arahnya radial ke inti bintang.

Di fase ini, semakin terang bintang (direpresentasikan oleh nilai luminositas yang tinggi) artinya bintang akan semakin masif dan mengemisikan peak panjang gelombang di daerah biru. Untuk bintang dengan nilai luminositas menengah, maka puncak panjang gelombangnya berada di daerah kuning. Adapun untuk bintang yang lebih redup (luminositas rendah) yang massanya lebih kecil, maka puncak

panjang gelombangnya berada di daerah merah. Bintang-bintang ini mengikuti sebuah *pattern* di mana temperatur, luminositas, radius, massa, dan puncak frekuensi yang diemisikan akan berkaitan dengan relasi empirik berikut ini.

$$L \approx 0.23M^{2.3}\{M < 0.43 Msun\} \quad 2.6$$

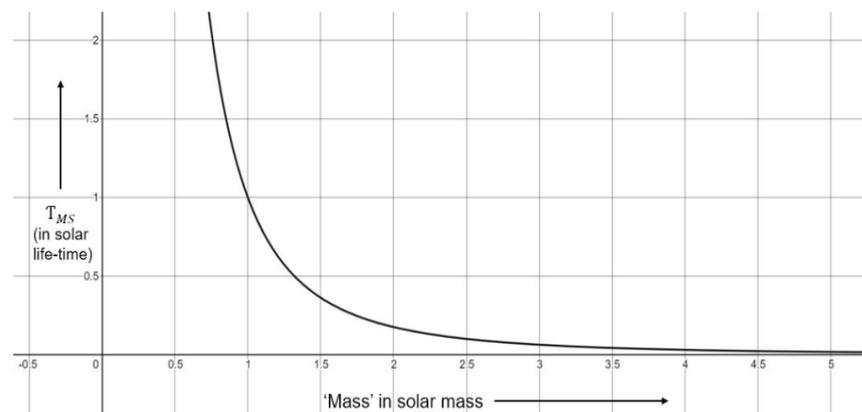
$$L \approx M^4\{0.43 Msun < M < 2 Msun\} \quad 2.7$$

$$L \approx 1.4M^{3.5}\{2 Msun < M < 55 Msun\} \quad 2.8$$

$$L \approx 3200M\{M > 55 Msun\} \quad 2.9$$

Siklus hidup untuk setiap bintang, seperti yang telah dibahas di bagian II.1, sangat bergantung pada massa awalnya. Massa awal ini kemudian akan menentukan masa hidup bintang dan juga fase akhir pada bintang sebelum mati. Bagian ini kemudian dalam astronomi dikenal juga dengan istilah teorema Vogt-Russell [19]. Untuk bintang dengan massa M (dinyatakan dalam satuan massa matahari, biasa dituliskan menjadi M_{\odot}), total waktu yang dibutuhkan oleh bintang di fase deret utama secara matematis dapat dinyatakan melalui persamaan berikut.

$$\tau_{MS} = 10^{10} \times M^{-2.5} \quad 2.10$$

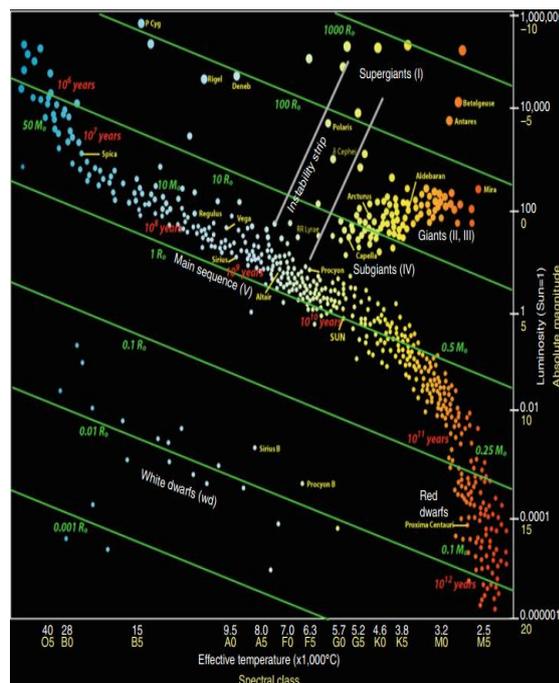


Gambar 2.5 Massa vs Masa Hidup di Fase Deret Utama Pada Bintang

Berdasarkan persamaan di atas, semakin besar massa dari bintang, semakin berkurang masa hidupnya (secara umum). Hal ini diakibatkan karena semakin besar massa, semakin besar gaya tarik gravitasi yang mengancam keruntuhan bintang. Oleh karena adanya kesetimbangan hidrostatik maka tekanan gravitasi yang mengarah ke dalam ini haruslah diimbangi oleh tekanan radiasi yang mengarah keluar dengan besar yang sama. Untuk menghasilkan tekanan radiasi yang dapat menjadi penyeimbang maka sebuah bintang masif harus membakar lebih banyak

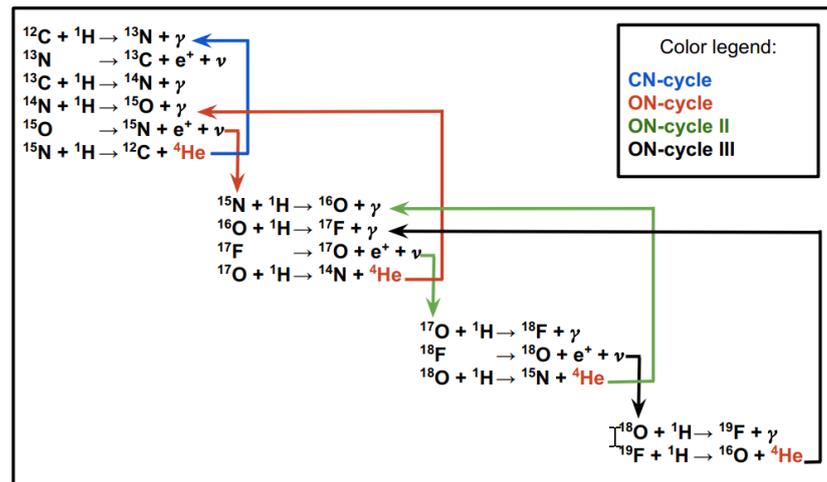
massa di dalam tubuhnya. Hal ini kemudian memberikan konsekuensi berupa usia bintang masif yang akan relatif lebih singkat.

Selain itu, bintang juga akan mengalami perubahan struktur secara perlahan diakibatkan oleh komposisi kimianya yang secara bertahap diubah oleh reaksi nuklir. Bintang masif diperkirakan menghabiskan waktu sekitar $10^6 - 10^7$ tahun di fase deret utama ini [8]. Karakteristik bintang di fase deret utama akan ditandai dengan radius bintang yang mengembang dan temperatur efektif yang menurun secara perlahan [21].



Gambar 2.6 Jejak evolusi bintang pada diagram HR [22].

Bintang masif akan memulai kehidupannya sebagai bintang deret utama dengan kelas spektral O. Oleh karena temperatur inti bintang akan semakin membesar ketika massa bintang membesar [17], bintang masif ketika di fase deret utama akan memiliki temperatur yang lebih besar dibanding bintang bermassa rendah. Bintang masif ini kemudian akan memiliki temperatur efektif sekitar 30,000 K - 50,000 K. Oleh karena temperatur permukaan yang relatif tinggi, mekanisme konversi hidrogen menjadi helium pada bintang masif terjadi melalui siklus karbon-nitrogen-oksigen (selanjutnya disingkat menjadi siklus CNO), dengan reaksi sebagai berikut [17]:



Gambar 2.7 Reaksi kimia siklus CNO (Karbon-Nitrogen-Oksigen).

Berakhirnya fase deret utama ditandai dengan habisnya hidrogen di inti bintang dan inti bintang akan mulai berkontraksi. Ketika inti berkontraksi, selubung yang berada di sekitar inti bintang akan mencapai temperatur dan kerapatan untuk selanjutnya memulai pembakaran hidrogen di selubung bintang (*H-burning shell*). Kombinasi dari inti bintang yang berkontraksi dan *H-burning shell* akan memberikan konsekuensi berupa “*mirror effect*” yang mana mengatakan bahwa ketika inti bintang berkontraksi, maka selubungnya akan berekspansi (berlaku sebaliknya). Ketika mekanisme ini terjadi, maka selubung bintang akan membesar dan bersifat konvektif.

Kontraksi inti dan ekspansi selubung akan berhenti ketika inti bintang memulai pembakaran helium [8][23][19][21] yang selanjutnya menjadi penanda bagi fase berikutnya yaitu fase *red supergiant*.

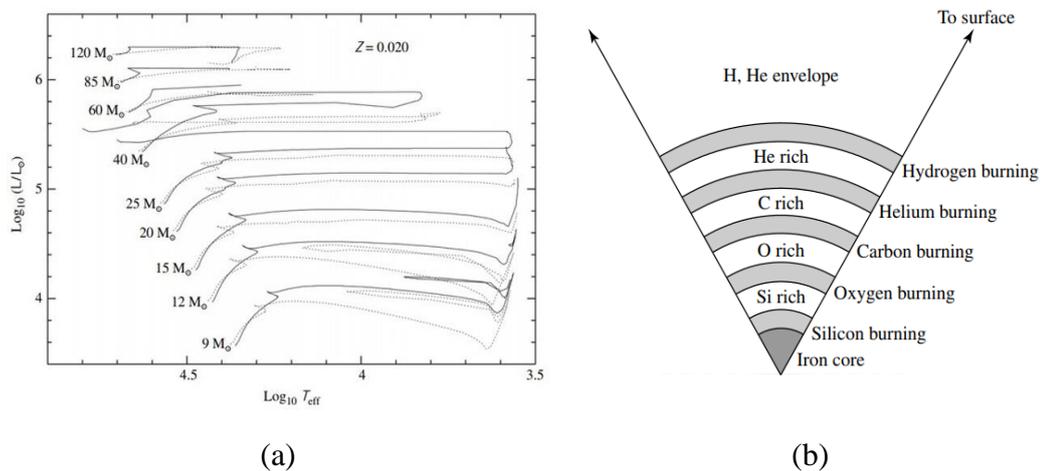
II.1.5 Fase Maharaksasa (*Red Supergiant Branch*)

Red supergiant (selanjutnya disingkat menjadi RSG) merupakan salah satu fase evolusi bintang masif pasca deret utama. Fase ini dimulai ketika bintang masif memulai pembakaran helium di intinya. Fase RSG ini dialami oleh bintang masif sebelum berevolusi menjadi bintang maharaksasa kuning, maharaksasa biru, wolf-rayet, atau justru merupakan fase akhir sebelum bintang masif mengakhiri hidupnya sebagai *core-collapse* supernova [8][24].

Pada diagram HR (gambar 2.6), bintang RSG terletak pada daerah kanan atas atau dikenal juga sebagai daerah “dingin” di diagram HR. Bintang RSG memiliki

kelas spektral K (*early K-type*) hingga M dan temperatur efektif dengan rentang 3500 K hingga 4500 K, luminositas dengan rentang 20,000 L_{\odot} hingga 300,000 L_{\odot} , serta radius sekitar 500 R_{\odot} hingga 1500 R_{\odot} [25][26][8][3][27]. Dengan karakteristik tersebut, bintang pada fase ini juga dikenal sebagai bintang terdingin di alam semesta dan juga sekaligus sebagai yang terbesar (dalam hal ukuran fisik) di antara anggota populasi bintang masif [8].

Seiring dengan berjalannya waktu, bintang masif di fase RSG ini akan membakar habis helium di inti bintang selama satu hingga dua juta tahun, kemudian dilanjutkan dengan membakar karbon di intinya. Pembakaran elemen kimia ini ak-



Gambar 2.8 (a) Jejak Evolusi Bintang Masif di Diagram HR. (b) Struktur Internal Bintang Masif.

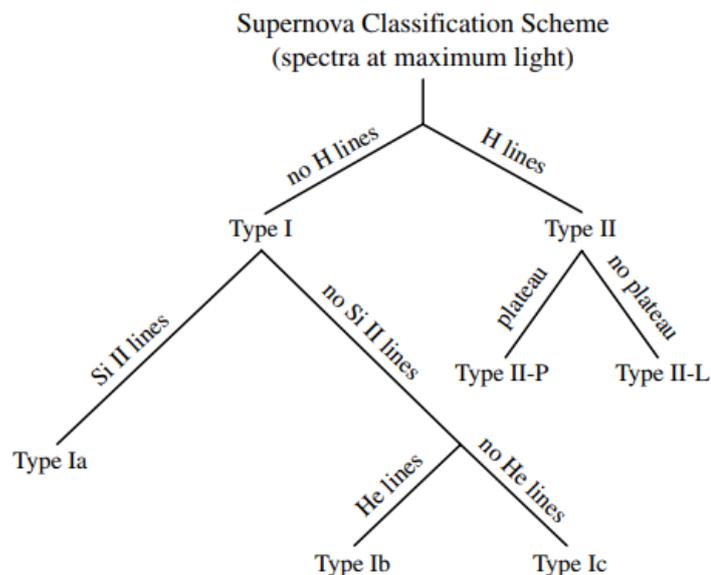
an terus berlanjut untuk elemen yang lebih berat lainnya seperti oksigen, silikon, hingga pada akhirnya akan mencapai inti besi di inti bintang. Sehingga nantinya bintang masif akan memiliki struktur layaknya lapisan bawang (berlapis-lapis) seperti **Gambar 2.8(b)**.

Besi kemudian dikenal sebagai logam yang sangat *inert*. Oleh karena itu, ketika bintang berhasil mencapai inti besi pada intinya, maka bintang memerlukan energi yang sangat besar sekali untuk melakukan pembakaran besi (*iron burning*). Energi yang sangat besar ini bahkan melebihi kapasitas bintang dalam menahan tekanan, sehingga yang terjadi adalah ledakan yang luar biasa yang selanjutnya dikenal dengan istilah supernova [17] yang kemudian akan menyisakan objek (remnant) berupa bintang neutron ataupun lubang hitam. Namun, tidak semua

bintang masif akan mengakhiri hidupnya di fase RSG dan meledak sebagai supernova saat berada di fase RSG. Bintang yang lebih masif lagi ($M_{\text{init}} \geq 30 M_{\odot}$) diprediksi akan kembali bergerak ke arah kiri diagram HR dan akan mengakhiri hidupnya sebagai maharaksasa kuning, maharaksasa biru, maupun wolf-rayet [16].

II.1.6 Supernova

Evolusi pasca deret utama pada bintang masif ($M_{\text{init}} \geq 8 M_{\odot}$) sejak dulu diperkirakan akan memiliki skema evolusi yang berbeda dari bintang dengan massa kurang dari $8 M_{\odot}$. Setelah pembakaran hidrogen menjadi helium di fase deret utama, kemudian diikuti oleh pembakaran helium menjadi karbon. Oleh karena temperatur tinggi yang terdapat pada inti, bintang masif masih mampu untuk membakar elemen karbon menjadi oksigen, kemudian oksigen menjadi silikon dan hingga pada akhirnya akan mencapai inti besi seperti pada **Gambar 2.8(b)** Sehingga daripada mengakhiri hidupnya sebagai planetari nebula, bintang masif justru akan mengakhiri hidupnya sebagai supernova ketika bintang tersebut mengalami keruntuhan inti pada titik ketika pembakaran nuklir tidak lagi memberikan dukungan untuk melawan tekanan gravitasi yang arahnya radial ke dalam [28][19][29].



Gambar 2.9 Klasifikasi Supernova

Ledakan bintang atau lebih dikenal dengan istilah supernova merupakan ledakan besar yang menjadi penanda bagi akhir kehidupan dari suatu bintang masif.

Kurva cahaya dan spektrum optik yang teramati yang dihasilkan oleh supernova sangat bermacam-macam dan mengandung informasi perihal struktur dan komposisi kimia dari bintang progenitor dan lingkungan antar bintangnya [30].

Supernova diklasifikasikan menjadi dua berdasarkan spektrum garis emisi yang teramati setelah ledakan, yaitu Supernova Tipe I dan Tipe II [31]. Supernova tipe I dan tipe II masing-masing kemudian dapat dibedakan berdasarkan dengan ketiadaan dan kenampakan garis hidrogen pada spektrum optiknya [31][32].

Bintang RSG sejak dulu dipercaya sebagai progenitor langsung dari supernova tipe II-P [1], merupakan tipe supernova yang memperlihatkan grafik plateau pada kurva cahaya pengamatan. Selama terjadinya fenomena supernova, yang mana akan secara langsung berperan terhadap pengayaan materi antarbintang, bintang masif akan melepaskan banyak sekali energi yang mengakibatkan selubung terluarnya akan diejeksikan ke medium antarbintang. Segera setelah berakhirnya fenomena ini, sisa inti bintang yang masih tersisa berdasarkan Oppenheimer–Volkoff limit (OV limit) selanjutnya akan berevolusi menjadi bintang neutron (apabila $M \leq 3 M_{\odot}$). Apabila sisa inti bintang melewati OV limit maka selanjutnya akan terbentuk lubang hitam (apabila $M \geq 3 M_{\odot}$) [8][17].

II.2 Kehilangan Massa dan Angin Bintang

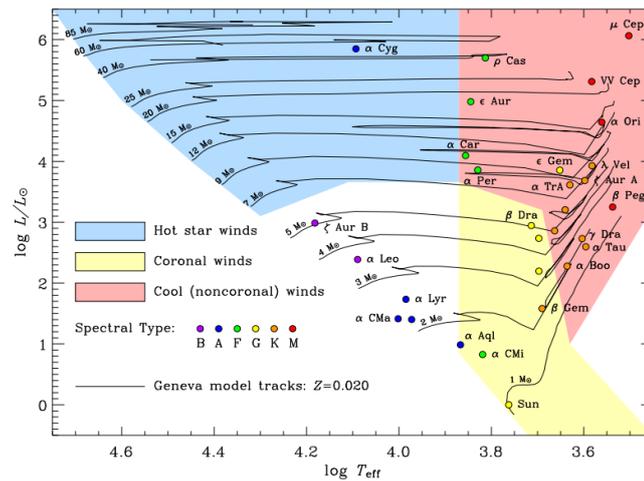
Istilah kehilangan massa bintang merupakan terminologi yang merujuk kepada fenomena fisis di mana bintang akan kehilangan sejumlah massa (materi) per satuan waktu. Massa yang hilang ini tidak secara harfiah benar-benar menghilang melainkan akan diejeksikan ke medium antar bintang. Semua bintang di alam semesta diyakini mengalami fenomena ini, hanya saja perihal bagaimana mekanisme kehilangan dan laju kehilangannya seperti apa akan berbeda untuk setiap bintang. Aliran/pancaran partikel (yang bersifat kontinu) dari permukaan bintang yang menggerakkan gas menjauh dari bintang selanjutnya dikenal dengan istilah angin bintang. Mekanisme fisis yang memicu terjadinya angin bintang pun selanjutnya akan berbeda-beda bergantung dari beberapa hal, seperti temperatur efektif, massa, luminositas, komposisi elemen kimia, dan medan magnet [33].

Berdasarkan bintang-bintang di alam semesta, angin bintang kemudian dapat diklasifikasikan menjadi tiga [5,34] yaitu (i) *coronal winds*, (ii) *dust-driven winds*,

dan (iii) *radiation-driven winds* atau dikenal juga dengan istilah *line-driven winds*. Adapun besaran yang menyatakan laju massa yang hilang selama bintang berevolusi dikenal dengan istilah laju kehilangan massa yang secara matematis dituliskan menjadi

$$\dot{M} \equiv -dM/dt \quad 2.11$$

Dan diekspresikan dalam satuan $M_{\odot} \text{ yr}^{-1} = 6.3 \times 10^{25} \text{ g s}^{-1}$.



Gambar 2.10 Angin Bintang pada diagram Hertzsprung-Russell [5]

Bintang masif dalam perjalanan hidupnya di fase pasca deret utama akan mengalami kehilangan massa yang signifikan yang dapat membuatnya mengalami kehilangan lebih dari separuh massa awalnya [8]. Kehilangan massa pada bintang teramati memiliki nilai yang besar pada bintang *luminous* dan panas yang terletak di bagian kiri atas pada diagram HR. Pada bintang ini, kehilangan massa disebabkan oleh angin bintang yang dibangkitkan oleh tekanan radiasi pada garis spektral ion yang disebut juga sebagai *line-driven winds* atau *radiation-driven winds*. Selain itu, laju kehilangan massa juga teramati besar pada bintang raksasa dan maharaksasa yang menempati daerah “dingin“ di bagian kanan atas diagram HR (RGB, AGB, dan RSG) di mana angin bintang dibangkitkan oleh tekanan radiasi pada debu (*dust-driven winds*) dan pulsasi bintang.

Tingginya laju kehilangan massa ($10^{-6} - 10^{-4} M_{\odot}$) pada kedua jenis bintang tersebut dapat memberikan konsekuensi pada perubahan jejak evolusi di fase RSG dan juga terhadap tipe supernova yang akan terjadi nantinya [4,17,34]. Konsekuensi lain dari kehilangan massa yang ekstrem adalah akan membuat

bintang kehilangan lapisan terluarnya dan menampakkan lapisan bagian dalam, yang kaya akan elemen kimia hasil dari proses *mixing* (pengadukan), pada permukaan bintang [17]. Kehilangan massa pada bintang disebabkan oleh beberapa hal, seperti angin bintang, pulsasi bintang, dan roche-lobe *overflow* yang terjadi pada sistem bintang ganda. Tugas akhir ini dibatasi dengan hanya meninjau fenomena kehilangan massa yang disebabkan oleh mekanisme angin bintang. Gambar 2.8 merupakan diagram HR yang memberikan informasi pemetaan daerah jenis-jenis angin bintang ini akan terjadi.

Dust-Driven Winds merupakan angin yang dibangkitkan oleh tekanan radiasi pada debu antarbintang. Secara umum angin tipe ini terjadi pada bintang cabang raksasa asimtotik dan juga pada bintang red supergiant. Laju kehilangan massa untuk tipe angin ini berada pada rentang $10^{-5} M_{\odot}/\text{tahun}$ hingga $10^{-4} M_{\odot}/\text{tahun}$ dengan kecepatan $\sim 10\text{-}50 \text{ km/s}^{-1}$ [17].

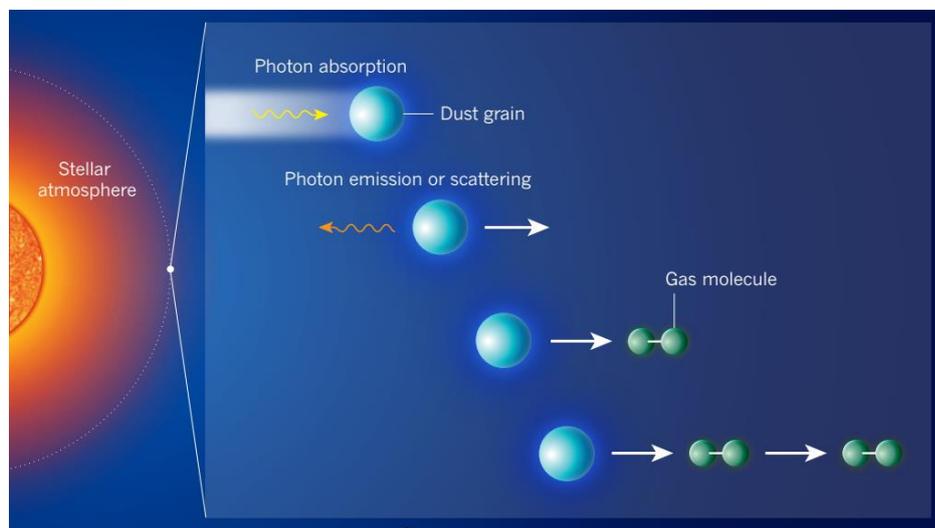
II. 3 Mekanisme Kehilangan Massa Bintang RSG

Skenario dasar terjadinya angin bintang di daerah “dingin” pada diagram HR atau khususnya pada bintang RSG diprediksi dipicu oleh beberapa mekanisme seperti (i) kombinasi dari pulsasi bintang dan tekanan radiasi pada debu (dikenal juga dengan istilah *dust-driven winds*), (ii) kombinasi dari fenomena konveksi skala besar dan *dust-driven winds*, (iii) *Alfrén-wave driven winds*, dan (iv) tekanan turbulen [35]. Tugas akhir ini sekali lagi, dibatasi hanya meninjau mekanisme (i) dan (ii).

Skenario kehilangan massa pada bintang RSG sejatinya merupakan proses dua langkah yang melibatkan pulsasi bintang (mekanisme i) dan fenomena konveksi skala besar (mekanisme ii) sebagai langkah pertama dan sekaligus juga berperan sebagai pemicu gelombang kejut, yang melontarkan material dari interior bintang, yang arahnya radial keluar bintang. Namun, perlu diingat bahwa pulsasi dan konveksi skala besar ini tidak mampu membawa material benar-benar “keluar” dari bintang dan teramati sebagai kehilangan massa. Melainkan, hanya pada radius tertentu di atmosfer bintang. Konsekuensi dari gelombang kejut yang dihasilkan oleh dua jenis proses ini terhadap atmosfer adalah terbentuknya lapisan/*layer*

(selanjutnya disebut zona kondensasi) dengan densitas yang lebih rapat di mana temperaturnya cukup rendah untuk memulai proses pembentukan debu [33,36–41].

Debu (dalam bahasa Inggris: *dust* atau *dust grain* untuk versi tunggal) kemudian merupakan substansi yang krusial pada langkah kedua dari skenario kehilangan massa ini. Apabila butiran debu mengalami kondensasi, momentum yang diperoleh dari foton yang dipancarkan oleh bintang, kemudian akan diabsorpsi atau diemisikan oleh debu yang mungkin saja mampu untuk melawan tarikan gravitasi dan mengakselerasi debu keluar dari bintang. Dalam perjalanannya debu akan bertumbukan dengan molekul gas. Tumbukan antara partikel debu dan molekul gas di sekelilingnya akan menyebabkan transfer momentum yang menjadi pemicu aliran kontinu dari permukaan bintang (angin bintang) [41]. Skenario kehilangan massa yang dipicu oleh tekanan radiasi pada debu (*dust-driven winds*) secara visual dapat dijelaskan melalui gambar 2.11 dan 2.12 berikut ini [33,42].



Gambar 2.11 Mekanisme kehilangan massa *dust-driven winds*

Laju kehilangan massa yang dihasilkan oleh skenario ini adalah sekitar $10^{-7} - 10^{-4} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ [34]. Adapun komposisi dari debu ditentukan oleh kelimpahan unsur relatif di atmosfer bintang, dimana bintang yang kaya akan karbon (*C-rich stars*) penyusun utama dari partikel debunya adalah karbon yang sifatnya amorf. Sementara itu, untuk bintang kelas M (*M-Type object*) penyusun utama dari partikel debunya adalah silikat.